

バーチャルセルラシステムにおける マルチホップネットワーク経路構築法

工藤 栄亮 安達文幸

東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 05

E-mail: kudoh@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 筆者らは超高速な無線ネットワークを構築するために、分散配置した多数の無線ポートとネットワークへのゲートウェイノードとなる中央無線ポートにより構成されるバーチャルセルラシステムを提案し、送信電力の大幅な低減および周波数利用効率の向上が可能であることを示してきた。本論文では、無線ポート～中央無線ポート間の通信にマルチホップ通信を適用した場合の経路構築法を示し、その送信電力およびホップ数の分布を計算機シミュレーションにより求めている。

キーワード バーチャルセル, 周波数繰り返し距離, 送信電力効率, 送信電力制御, ダイバーシチ

Multihop routing construction for virtual cellular network

Eisuke KUDOH and Fumiyuki ADACHI

Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

E-mail: kudoh@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract: A virtual cellular system, which consists of a central port and many distributed wireless ports, was proposed recently to show that the virtual cellular system can significantly reduce the transmit power while increasing frequency efficiency. In the virtual cellular system, data relaying between central port and wireless ports is necessary. In this paper, multi-hop wireless system is applied. The virtual cellular control layer is introduced for the multi-hop transmission. A routing algorithm which minimizes the total uplink transmit power is presented. The transmit power efficiency and the number of hops are evaluated by computer simulation. It is found that multi-hop communication can reduce the transmit power of wireless port considerably while avoiding unnecessary large time delay.

Keyword: Virtual cellular, Frequency reuse distance, Transmit power efficiency, Transmit power control, Diversity

1. まえがき

第3世代の移動通信システムであるIMT-2000では最大2Mbit/sの伝送が可能である。しかしながら、インターネットの普及が促進され、リッチなコンテンツが広く流通するようになれば、やがてIMT-2000の伝送速度でさえ不十分となり、100Mbit/s～1Gbit/s程度のピーク伝送速度が要求されると思われる。2010年ころに登場すると期待されている第4世代移動通信システムでは、このようなブロードバンド無線サービスの提供が求められている。しかしながら、高速無線伝送を実現するにはピーク送信電力の増大という非常に困難な課題を克服しなければならない。これを緩和するためには、セル半径を小さくする必要があり、極小セルラシステムをいかに実現するかが、重要な技術課題となる[1],[2]。筆者らは、極小セルラシステムを構築するためのバーチャルセルラシステムを提案し、その平均

送信電力の低減効果と周波数利用効率について明らかにしてきた[3],[4]。

バーチャルセルラシステムの構成を図1に示す。バーチャルセルラシステムは分散配置される多数の無線ポートとネットワークへのゲートウェイとなる中央無線ポートからなる。移動端末は多くの無線ポートと同時に通信を行う。したがって、上りリンクでは各無線ポートで受信された信号を中央無線ポートへ転送しなければならない。また下りリンクでは中央無線ポートから各無線ポートへ同一の信号をマルチキャストしなければならない。もしも全ての無線ポートが中央無線ポートと直接通信すれば、パシロス、シャドウイングロス、マルチパスフェージングの影響により非常に大きな送信電力を必要とする無線ポートが生じる。このような送信電力の増大を避けるためにマルチホップ無線通信の適用が考えられている[5]。

無線ポート間のマルチホップ通信ネットワークを構

築するためには経路構築法が重要となってくる．この際，アドホックネットワークやマルチホップネットワークでの検討が参考になる[6]-[9]．バーチャルセルラシステムでは現在のセルラシステム同様，同一周波数を繰返して用いる．したがって，送信電力が低減されれば他のバーチャルセルに与える干渉電力が減少し，周波数再利用距離も小さくできる．文献[9]には総送信電力を最小とする経路構築法が示されており，最大ホップ数が2の場合について送信電力特性が示されている．

本論文では，無線ポート間のマルチホップ通信を実現するためにバーチャルセルラ制御層を新たに設けることを提案している．さらに送信電力を最小とする経路構築法を示し，その特性を計算機シミュレーションにより求める．

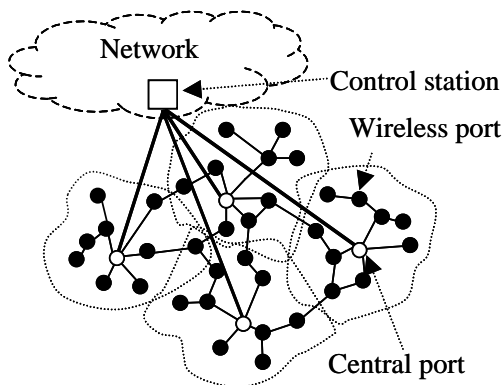


図1 バーチャルセルラシステム

2. マルチホップネットワーク

マルチホップ通信を制御するために，データリンク層とネットワーク層の間にバーチャルセルラ制御層を挿入する．図2はバーチャルセルラシステムのレイヤ構成を示す．移動端末から送信された信号は複数の無線ポートで受信される．無線ポートはダイバーシチブランチとして作用するので移動端末の送信電力を大幅に低減することが可能となる[3], [4]．バーチャルセルラ制御層では，無線ポート間のマルチホップネットワークの経路制御を行う．中央無線ポートがネットワークへのゲートウェイとなるので，ネットワーク制御局からはバーチャルセルが1つのセルとして認識される．したがって，バーチャルセル内で移動端末が移動しても，ネットワークに対するハンドオーバーの制御トラヒックの増大は生じない．

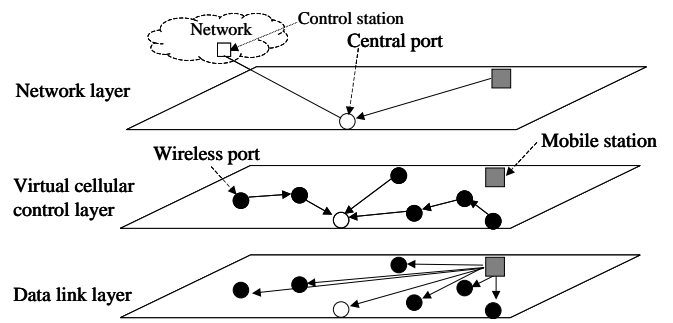


図2 バーチャルセルラシステムのレイヤ構成

3. 経路構築法

3.1. 上りリンク

移動端末から送信された信号を各無線ポートで受信し，その信号を中央無線ポートへ転送する．経路に沿った無線ポート全ての送信電力の総和が最小となるようにマルチホップ通信の経路を構築する．図3に経路構築におけるメッセージフローを示す．経路構築要求メッセージが定期的に全ての無線ポートから送信される．中央無線ポートは，転送されてきた経路構築要求メッセージを受信すると，マルチホップ通信により経路構築確認メッセージを各無線ポートへ送信する．

経路構築要求メッセージのヘッダ部には{a.送信電力，b.要求元の無線ポートアドレス，c.ホップ数，d.送信している無線ポートのアドレス，e.当該経路上の各無線ポートの所要送信電力の総和}が含まれる．経路構築確認メッセージのヘッダ部には，{a.宛先の無線ポートのアドレス，b.送信している無線ポートのアドレス，c.経路構築要求元の無線ポートのアドレス，d.宛先の無線ポートの所要送信電力}が含まれる．経路構築アルゴリズムを以下に示す．

- step1: 経路構築を要求する無線ポート $\#k(0)$ が送信電力 $P_t(k(0))$ で経路構築要求メッセージを送信する．
 step2: 無線ポート $\#k(n-1)$ からの経路構築要求メッセージを受信した無線ポート $\#k(n)$ はホップ数 n が許容最大ホップ数 N 以下である場合には，無線ポート $\#k(n-1)$ の所要送信電力 $P_{t,req}(k(n-1),k(n))$ を以下の式から求める．

$$P_{t,req}(k(n-1),k(n)) = P_{req} + P_t(k(n-1)) - P_r(k(n)) \text{ in dB} \quad (1)$$

ここで P_{req} は所要受信電力， $P_t(k(n-1))$ は無線ポート $\#k(n-1)$ の送信電力， $P_r(k(n))$ は無線ポート $\#k(n)$ における受信電力である．無線ポート $\#k(n)$ に到達するまでの経路における各無線ポートの所要送信電力の総和 P は以下のように表される．

$$P = \sum_{i=1}^n P_{t,req}(k(i-1),k(i)) \quad (2)$$

もしも無線ポートが複数の経路構築要求メッセージを受信した場合には最も P が小さくなる経路構築要求メッセージのみを転送する。例えば、図3において、無線ポート#3 が無線ポート#1 と無線ポート#2 からの経路構築要求メッセージを受信し、 $P_{t,req}(1,2) + P_{t,req}(2,3) < P_{t,req}(1,3)$ であれば、無線ポート#3 は無線ポート#2 からの経路構築要求メッセージを転送する。

step3: 中央無線ポートは総所要送信電力 P が最も小さい経路を選択し、経路確認メッセージを送信する。

step4: 各無線ポートが受信した経路確認メッセージのヘッダの宛先アドレスに自局のアドレスが含まれている場合にはそのメッセージを転送する。

step5: 経路構築要求元の無線ポートが経路通知メッセージを受け取る。

以上各無線ポートから経路構築要求メッセージを送信する場合について示したが、中央無線ポートから経路構築要求メッセージを送信して経路を構築することも可能である。

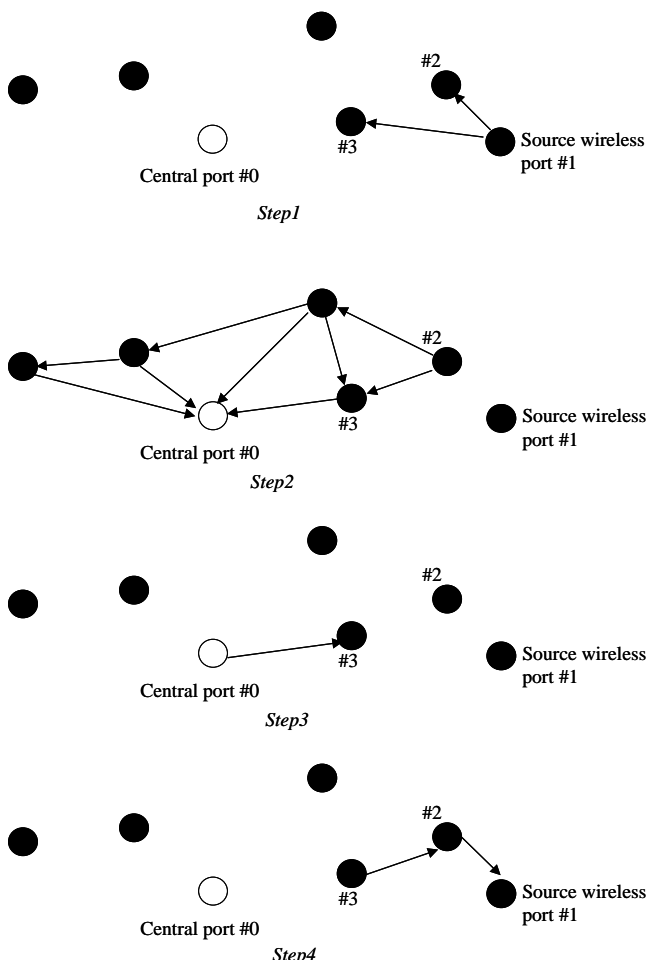


図3 経路構築メッセージフロー

3.2. 下りリンク

下りリンクではネットワーク制御局から送られてき

たデータ信号を中央無線ポートがバーチャルセル内の全ての無線ポートへマルチホップ通信によりマルチキャストし、全ての無線ポートから移動端末へ送信する。マルチキャストの経路は上りリンクの経路と同一とする。下りリンクでは複数の無線ポートに同一の信号を同時に送信できるため、上りリンクの場合よりも無線ポートの総送信電力を小さくできる。

4. 計算機シミュレーション

無線ポート～中央無線ポート間の通信にマルチホップ通信を適用したときの送信電力およびホップ数の分布を計算機シミュレーションにより求める。信号電力対雑音電力比(SNR)に基づく低速送信電力制御を仮定し、無線ポートはランダムに配置するものとする。

4.1. 送信電力効率

図4にシングルホップ時の全無線ポートの総平均送信電力で正規化した1バーチャルセルに存在する全無線ポートの総送信電力の平均(総平均送信電力)を示す。パスロス指数 $\alpha=3.5$, シャドウイングの標準偏差 $\sigma=7(\text{dB})$ とし、 N は許容最大ホップ数、 K は中央無線ポートも含めた無線ポート数を示す。マルチホップ通信を適用することにより総平均送信電力を大幅に低減できることがわかる。また、 N が大きくなると総平均送信電力はほぼ一定値となる。例えば、 $K=10, 20, 50$ の場合、最大許容ホップ数をそれぞれ $N=4, 6, 8$ に制限しても N を制限しない場合とほぼ同等の総平均送信電力となる。

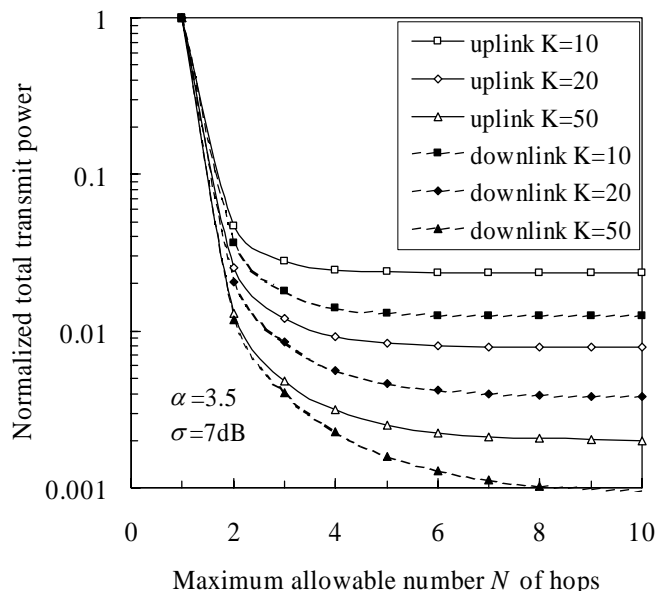


図4 正規化(全無線ポート)総平均送信電力

図5にパスロス指数 α をパラメータとしてシングルホップの時の全無線ポートの総平均送信電力で正規化した全無線ポートの総平均送信電力を示す。ここで $K=20, \sigma=7(\text{dB})$ としている。 α の値にかかわらず $N=6$ 付近でほぼ一定の総送信電力になっている。また、 α が大きいほど正規化総送信電力は小さくなる。これは

α が大きいほど距離によるパスロスの差も大きくなるため、短い距離での通信が可能となるマルチホップ通信による送信電力低減効果が大きくなるためである。

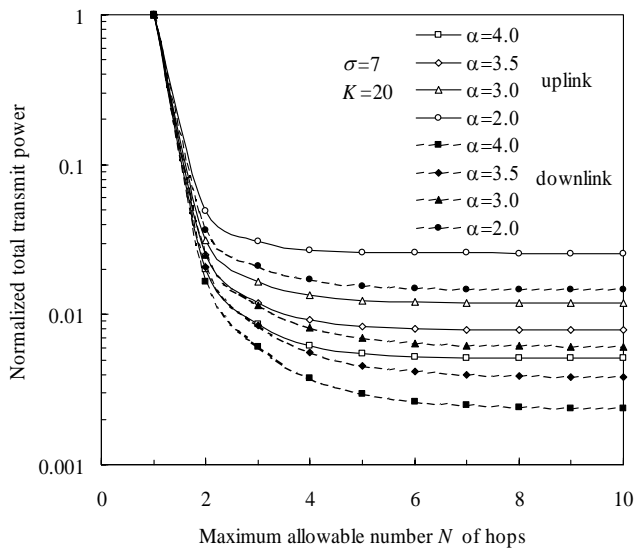


図5 パスロス指数 α が正規化（全無線ポート）総平均送信電力に与える影響

図6にシャドウィングの標準偏差 σ をパラメータとしたシングルホップの時の全無線ポートの総平均送信電力で正規化した全無線ポートの総平均送信電力を示す。ここで $K=20$, $\alpha=3.5$ としている。 σ の値にかかわらず $N=6$ 付近でほぼ一定の総送信電力になっている。また、 σ が大きいほど正規化総平均送信電力は小さくなる。これは σ が大きいほどマルチホップ通信を行うときの経路ごとの伝搬ロスのばらつきが大きくなり、ルートダイバーシチ効果による送信電力低減効果が大きくなるためである。

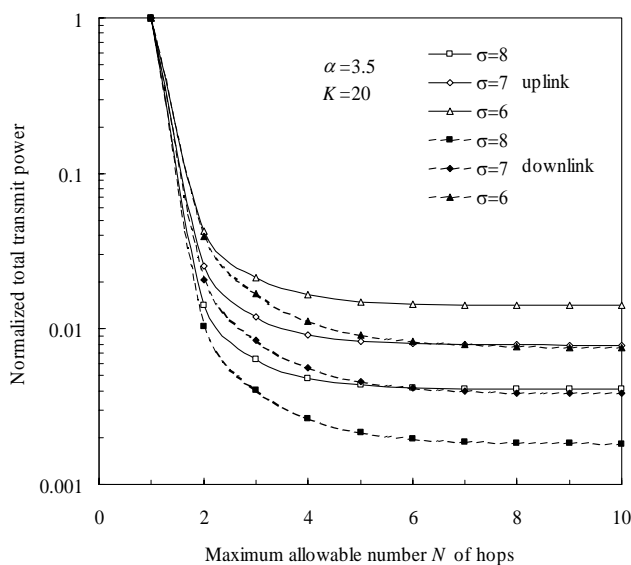


図6 シャドウィングの標準偏差 σ が正規化（全無線ポート）総平均送信電力に与える影響

総送信電力ばかりでなく、各無線ポートの送信電力もシステムを設計する際には重要なパラメータとなる。そこで、各無線ポートの送信電力の累積分布を求めた。図7にシングルホップの時の1無線ポートあたりの平均送信電力で正規化した各無線ポートの上りリンクの送信電力の累積分布を示す。ここで $K=20$ とした。マルチホップを適用することにより、各無線ポートの送信電力を大幅に低減できることがわかる。また、 $N=7$ のときの累積分布はほとんど一致しており、この結果からも最大許容ホップ数を制限可能であることがわかる。

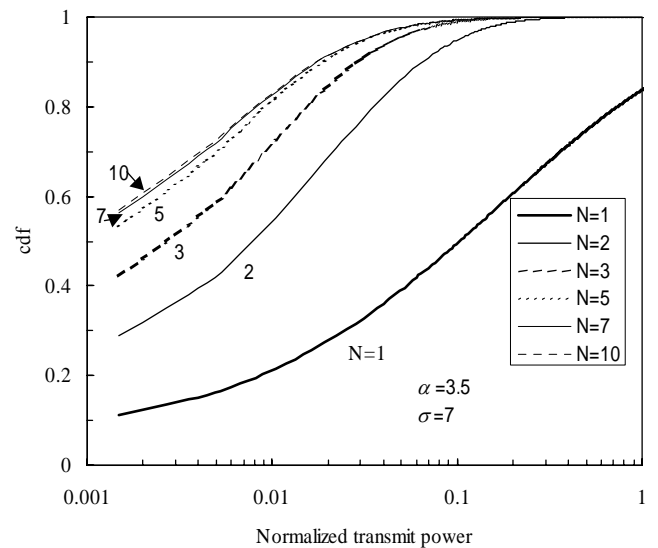
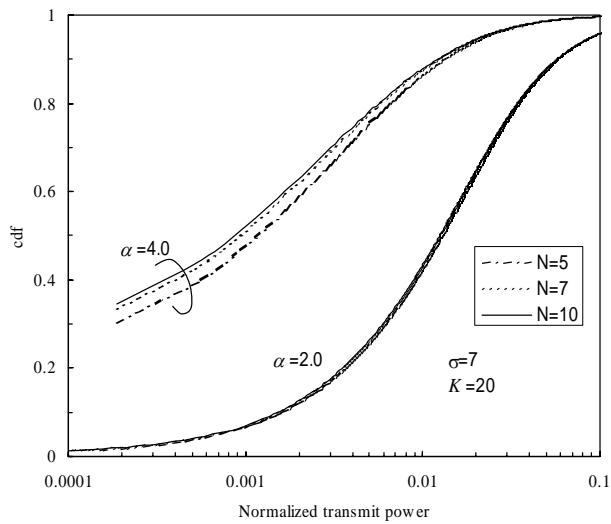
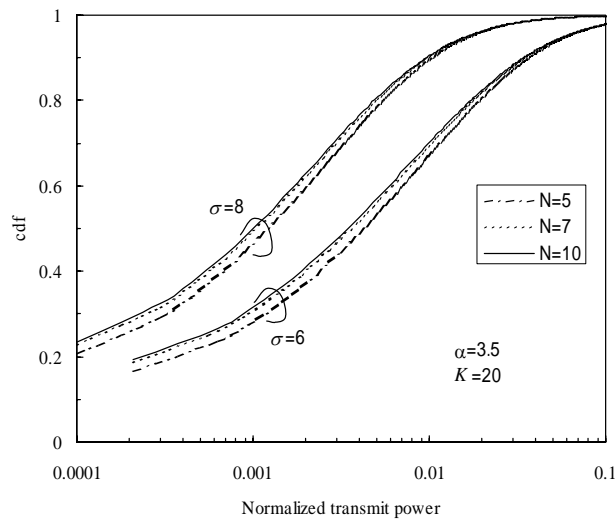


図7 1無線ポートあたりの送信電力の累積分布

図8にパスロス指数 α とシャドウィングの標準偏差 σ をパラメータとした1無線ポートあたりの送信電力の累積分布を示す。 α および σ が大きいほど、送信電力が小さくなる確率が高くなっている。また、正規化総平均送信電力の累積分布の結果と同様に、 α および σ の値にかかわらず $N=7$ のときの累積分布はほとんど一致している。



(a) パスロス指数 α の影響



(b) シャドウィングの標準偏差 σ の影響

図8 α と σ をパラメータとした1無線ポートあたりの送信電力の累積分布

4.2. ホップ数

図9にホップ数の累積分布を示す。ここで $K=20$ とした。累積分布は $N=7$ ではほぼ等しくなっている。例えば、ホップ数が4(5)よりも大きくなる確率は N の値にかかわらず、20(10)%以下である。このことから最大許容ホップ数を制限可能であることがわかる。

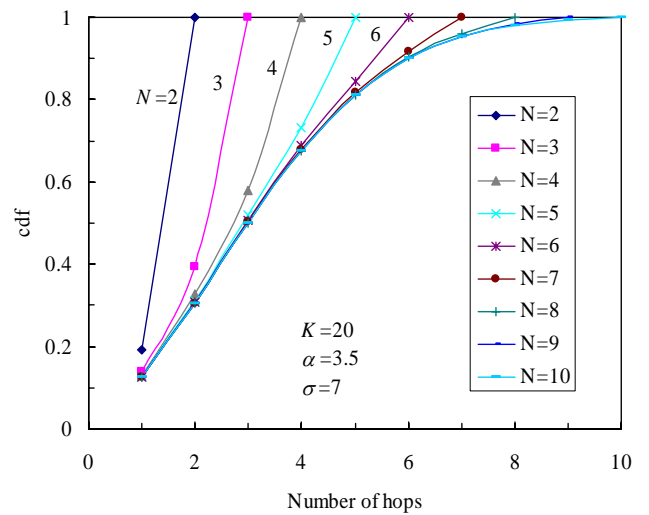
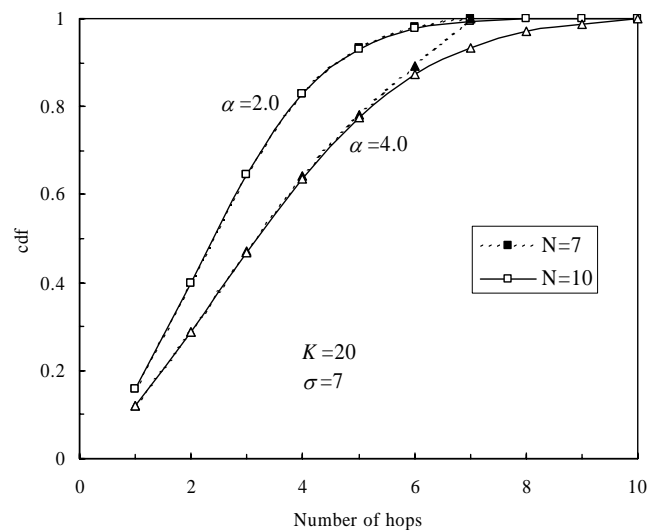
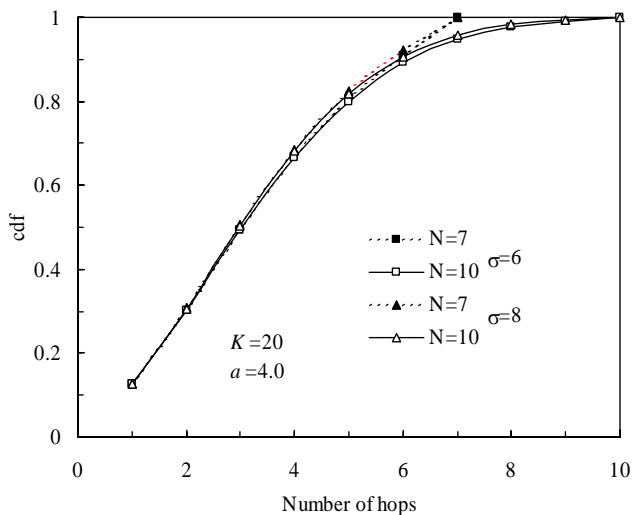


図9 ホップ数の累積分布

図10にパスロス指数 α とシャドウィングの標準偏差 σ をパラメータとしたホップ数の累積分布を示す。ホップ数の累積分布も α および σ の値にかかわらず $N=7$ のときの累積分布はほとんど一致している。



(a) パスロス指数 α の影響



(b)シャドウィングの標準偏差 σ の影響

図 10 α と σ をパラメータとしたホップ数の累積分布

5. むすび

バーチャルセルラシステムを実現するためのマルチホップネットワークにおいて, 上りリンクの総送信電力を最小とする経路構築法を示し, その送信電力効率, ホップ数の分布特性を示した. その結果, マルチホップ通信を適用することにより, 伝送遅延を制限しつつ送信電力を著しく低減できることを示した.

参考文献

- [1] F. Adachi, "Wireless past and future-evolving mobile communication systems", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E84-A, no.1, pp.55-60, Jan. 2001.
- [2] T. Otsu, Y. Aburakawa and Y. Yamao, "Multi-hop wireless link system for new generation mobile radio access networks", IEICE Trans. Commun., vol. E85-B, no.8, pp.1542-1551, Aug. 2002.
- [3] 工藤, 安達, "バーチャルセル無線ネットワークにおける送信電力効率と周波数利用効率", 信学技報, RCS2002-323, pp.99-104, March 2003.
- [4] E. Kudoh and F. Adachi, "Power and frequency efficient virtual cellular network", Proc. IEEE VTC'2003 spring, Cheju, Korea, April 2003.
- [5] E. Kudoh and F. Adachi, "Transmit Power Efficiency of a Multi-hop Virtual Cellular System", to be presented at IEEE Vehicular Technology Conference 2003 fall.
- [6] E. M. Royer and C. K. Toh, "A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks", IEEE Personal Commun., pp.46-55, April 1999.
- [7] 向井, 村田, 吉田, "マルチホップ自律分散無線ネットワークにおけるチャンネル選択アルゴリズムと確立ルート数の検討", 信学論, vol.J85-B, no.12, pp.2080-2086, Dec. 2002.
- [8] C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing", IEEE proc. WMCSA'99, pp.90-100, Feb. 1999.
- [9] 藤原, 竹田, 吉野, 大津, 山尾, "ブロードバンド CDMA セラ方式におけるマルチホップアクセス